

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760396

研究課題名(和文)磁気浮上搬送制御のための三次元位置推定および浮上・搬送制御の実現

研究課題名(英文)Three-Dimensional Position Estimation and Levitation and Conveyance Control for An Active Electromagnetic Levitation Conveyance System

研究代表者

小林 義光(Kobayashi, Yoshimitsu)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：40509270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：磁気浮上搬送は、対象物体を非接触で搬送できる利点があるが、鉛直方向の安定浮上と水平方向の制振制御を実現するためには対象物体の3次元位置の検出が必要であり、その位置センサの配置等が課題として挙げられる。そこで、本研究では、電磁石の電流と電磁石の磁極部に配置した4個のホール素子の磁束情報から、オブザーバにより3次元位置を推定し、その推定位置を用いて鉛直方向の安定浮上を実現し、また2自由度積分型最適サーボ系を用いて水平方向の制振制御と搬送制御が両立できることを実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：Generally, a magnetic levitation conveyance system is useful when we convey products without qualitative degradation due to contact. However it is necessary to control the three-dimensional motion of the levitated object and it is difficult to measure the position. Therefore we propose how to estimate three-dimensional position without a position sensor. Four Hall elements are installed on the bottom of the electromagnet instead of the position sensor. A state observer estimates the three-dimensional position of the levitated object from the four Hall voltages and the current and the input voltage to the electromagnet. The magnetic levitation uses a state-feedback control based on the estimated vertical position. A two-degree-of-freedom controller combining an optimal servo control with an integral compensator for disturbances is applied to the magnetic levitation conveyance system. The validity of the proposed method is confirmed by simulation and experiment results.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：制御システム 磁気浮上 3次元位置推定 オブザーバ ホール素子 搬送 非接触

1. 研究開始当初の背景

一般に生産現場における産業ロボット等に用いられるロボットハンドの多くは、機械部品を直接把持する接触把持機構である。近年、製造機械の高性能化に伴って、多品種で高精度な機械部品の製造が求められている。そのため、搬送時の接触による物体の表面品質の低下やハンド形状によって把持可能な物体が制限されるなどの課題が挙げられる。そこで、機械部品を非接触で搬送することができれば、これらの課題が解消でき、一般的に接触搬送が困難な機械部品（例えば、塗装物や微小物体など）への対応が期待できる。このような背景から、非接触把持の代表的な技術である磁気浮上技術を応用して、非接触把持搬送の研究が多数行われている。しかし、磁気浮上システムは、一般的に不安定なシステムであることから、レーザ変位センサ等の外界センサを利用し、浮上物体の位置を検出することで安定浮上を実現しているが、センサの配置やコストの問題が生じ、搬送装置への応用が困難である。

2. 研究の目的

本研究では、これらの課題を解決して磁気浮上搬送系の実現性と利用性を向上させるため、外界センサの配置を必要としない3次元位置推定と非接触把持搬送のロバスト性を向上させるための手法を確立することが目的である。

3. 研究の方法

磁気浮上搬送時の変位センサの配置とコストの問題を解決するため、電磁石の電流と電磁石の磁極部に配置した4個のホール素子のホール電圧（磁束情報）を計測することで、浮上物体の3次元位置を推定し、その推定位置を用いて鉛直方向の安定浮上と水平方向の制振制御と搬送制御を実現する方法を検討した。

浮上物体の3次元位置推定を確立するために、電磁石の磁極部に4個のホール素子を配置して、浮上物体の3次元位置とホール電圧の関係式を導出した。その関係式からオブザーバを用いて浮上物体の3次元位置を推定し、その推定位置をフィードバックすることで鉛直方向の安定浮上を実現した。また、水平方向に対しては、2自由度制御系を適用することで、制振制御と搬送制御の両立を実現した。その有効性を数値シミュレーションと実機実験によって確認した。

4. 研究成果

(1) 図1に示す実験装置を製作し、水平方向に移動可能な2軸ステージ上に単極電磁石を配置し、磁気浮上搬送系を実現する。図2に実際に製作した実験装置に写真を示す。また、電磁石の磁極部には、図3に示すホール素子基板を配置し、4個のホール素子を6mm間隔で配置した。

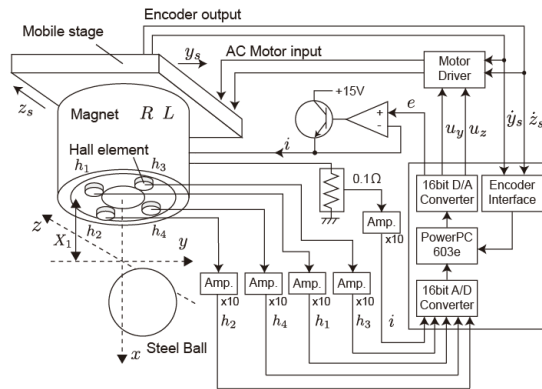


図1. 磁気浮上搬送系の実験装置

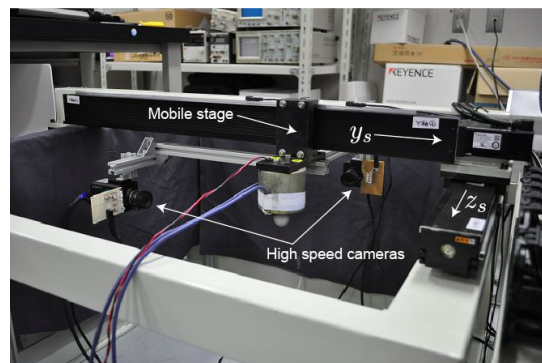


図2. 磁気浮上搬送系の実験装置の写真

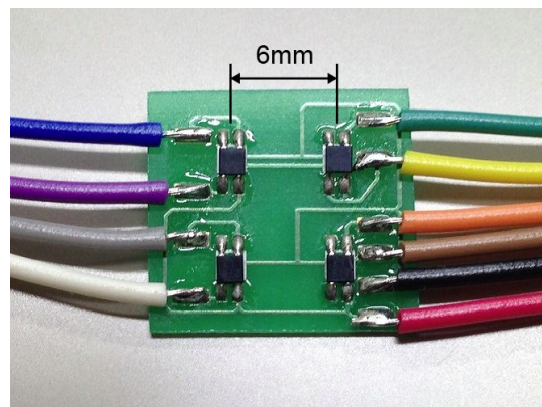


図3. ホール素子基板

(2) 3次元位置推定を実現するため、浮上物体の3次元位置と電磁石の電流に対するホール電圧変化を測定した。図4～7に浮上物体の3次元位置と電磁石の電流に対するホール電圧変化を示す。この測定結果からホール電圧の関係式を導出し、浮上物体の運動方程式、電磁石の電気回路方程式、電磁石の水平移動を実現するステージの運動方程式から状態方程式を算出し、オブザーバを設計した。

(3) 鉛直方向の浮上制御と水平方向の制振制御には、推定位置を用いた状態フィードバック制御を使用した。ここで、ホール電圧の関係式の近似誤差や温度変化による出力変動に対する浮上制御のロバスト性を確保するため、オブザーバは、安定余裕を大きく確保することに着目して設計した。

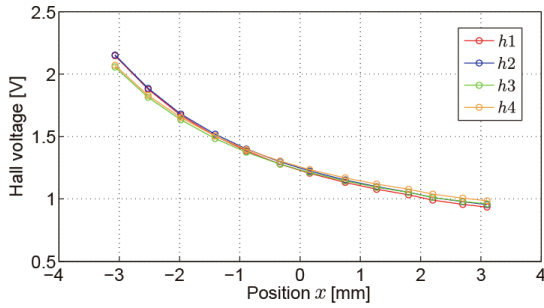


図 4 . 鉛直位置 x とホール電圧の関係

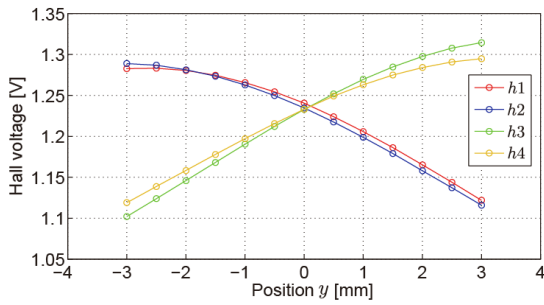


図 5 . 水平方向 y とホール電圧の関係

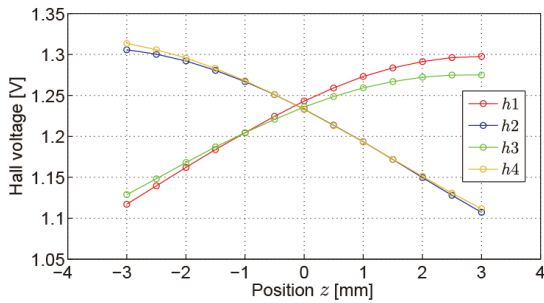


図 6 . 水平方向 z とホール電圧の関係

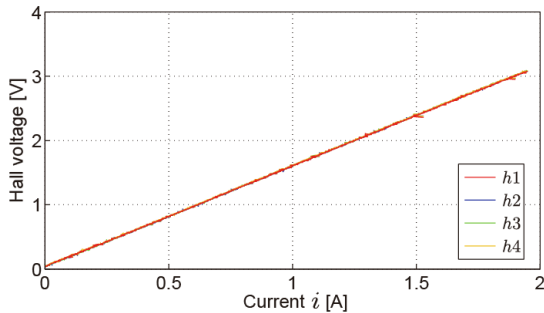


図 7 . 電流 i とホール電圧の関係

図 8 に安定余裕を確認するためのナイキスト線図を示す．オブザーバの位置に対する重力 q_x を小さく設定し，電流の重力 q_i を大きく設定することで，オブザーバを用いた状態フィードバック制御系のナイキスト線図（青線）が，最適レギュレータのナイキスト線図（赤線）に漸近し，安定余裕を大きく確保することができた．

この制御系の評価として，浮上実験による外乱応答で評価した．図 9 に実際に浮上制御を実施した場合の実験写真を示す．

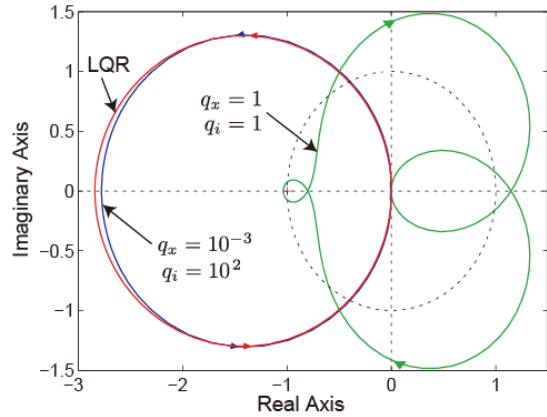


図 8 . ナイキスト線図

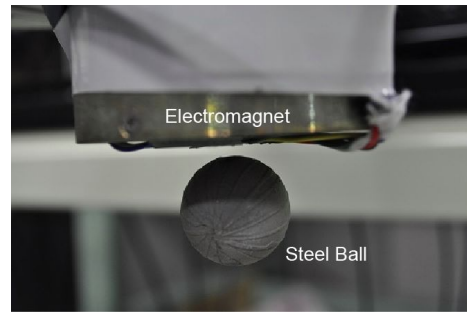


図 9 . 浮上制御の実験写真

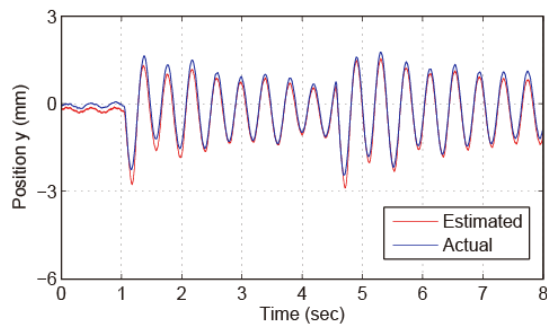
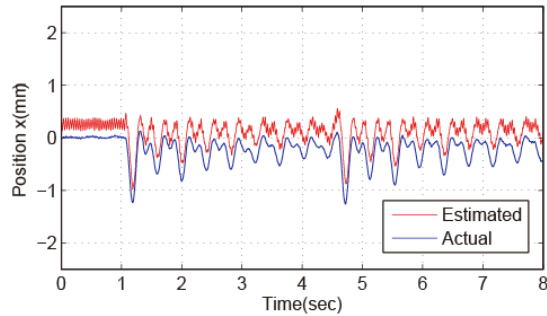


図 10 . 浮上制御の実験結果

図 10 に鉛直方向の浮上制御のみを実装した場合，図 11 に鉛直方向の浮上制御と水平方向の制振制御を実装した場合において，水平方向からのインパルス外乱を加えた実験結果を示す．推定値（赤線）との比較のため，実測値（青線）は高速カメラより算出した．図 10 より 安定余裕の確保を優先するため，位置に対して推定誤差が確認できるが，イン

パルス外乱に対しても安定浮上が実現できていることが確認できる。水平方向に対しては制振制御を適用しない場合は、発生した振動が収束していないことが確認できる。一方で、図 11 では制振制御の適用により水平方向の振動も速やかに抑制されていることが確認できるが、ステージのモータ駆動によるノイズが推定値に影響を及ぼしていることが確認できる。

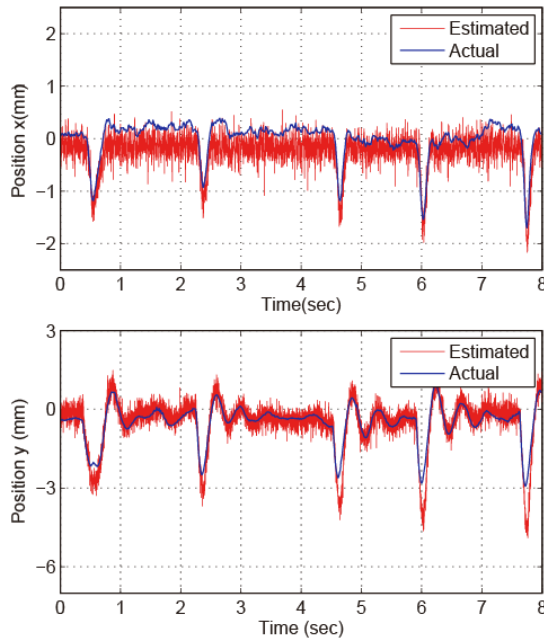


図 11．浮上制御と制振制御の実験結果

(4)水平方向の搬送制御を確立するために、目標搬送軌道の生成方法を検討した。搬送によって浮上物体が振動すると、制振制御の動作によって目標軌道への追従が困難になるため、浮上物体の振動励起を抑制する目標軌道を生成した。

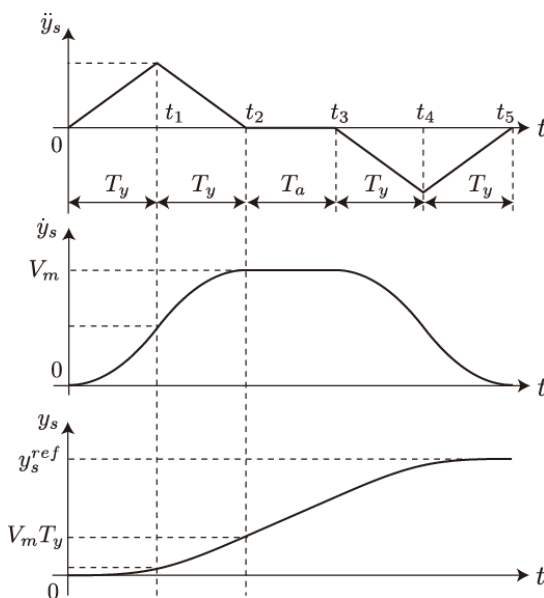


図 12．目標搬送軌道の生成

図 12 に水平 y 方向に搬送するためのステージの目標加速度，目標速度および目標移動距離を示す。加速度の加減速時間を浮上物体の水平方向の固有振動周期 $T_y=0.4[\text{sec}]$ の整数倍で設定することで、浮上物体の振動が励起されないことを理論と数値シミュレーションで確認した。実機での評価のため、図 10 と同様に浮上制御のみを実装した状態で、搬送実験を実施した。

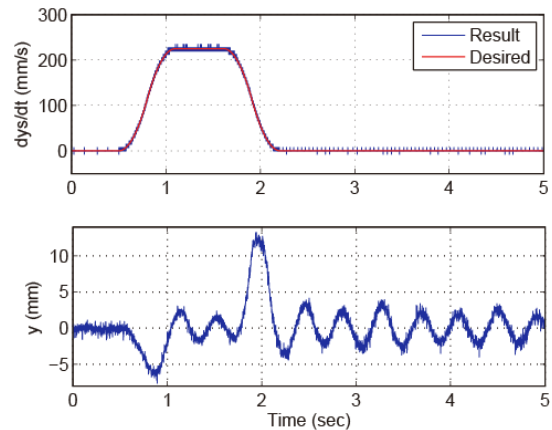


図 13．固有振動周期の非整数倍の結果

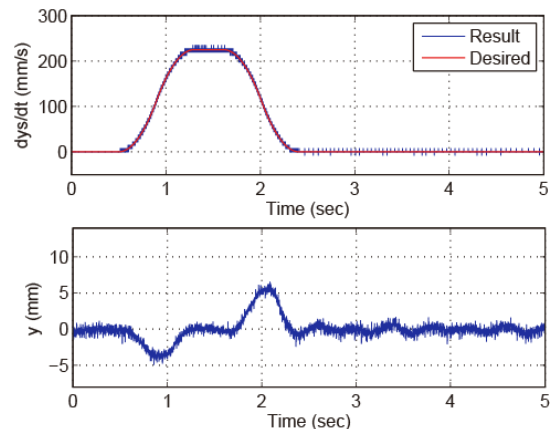


図 14．固有振動周期の整数倍の結果

図 13 に固有振動周期 $T_y=0.4[\text{sec}]$ の非整数倍 $T_y=0.3[\text{sec}]$ で加減速を設定した場合、図 14 に整数倍 $T_y=0.4[\text{sec}]$ で加減速を設定した場合の搬送結果を示す。実験結果の比較から、固有振動周期の整数倍で加減速を設定すると、加速後および減速後に浮上物体の振動励起が抑制されていることが確認できる。しかし、図 14 の結果から、数値シミュレーションで検証した結果とは異なり、停止後も若干の振動励起が確認でき、実機の固有振動周期の同定に誤差があると考えられる。

(5)固有振動周期の同定誤差や搬送中の外乱による振動励起を抑制するため、図 11 と同様に状態フィードバックによる制振制御を実施した状態で、搬送制御の追従性を確保することを検討した。制振性と追従性を両立するため、水平方向に対して 2 自由度積分型最適サーボ系の適用を評価した。図 15 に 2 自

由度積分型最適サーボ系の構成図を示す．外乱が作用しない場合は，フィードバックゲイン F_0 とフィードフォワードゲイン H_0 のみが作用する最適サーボ系が動作し，外乱が作用した場合には積分補償が動作するものである．

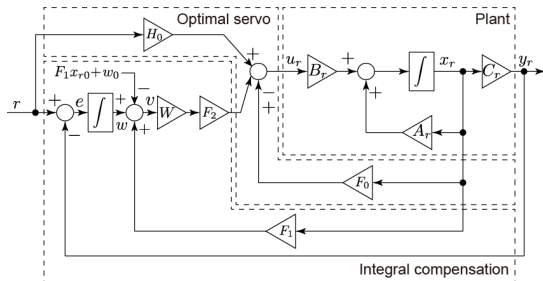


図 15．2 自由度積分型最適サーボ系

図 13 と 14 と同条件で，固有振動周期 $T_y=0.4$ [sec] の非整数倍 $T_y=0.3$ [sec] と整数倍 $T_y=0.4$ [sec] で加減速を設定した場合の 2 自由度積分型最適サーボ系を用いた搬送実験の結果を図 16 と 17 に示す．図 16 において，非整数倍でも 2 自由度積分型最適サーボ系を適用することで，停止後の振動励起を抑制すること可能であることが確認できる．また，図 17 においても，図 14 の残留振動が抑制されており，固有振動数の変化にも対応できることが確認できた．

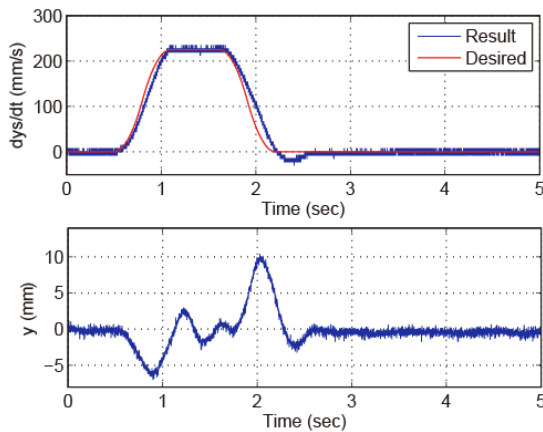


図 16．固有振動周期の非整数倍の結果

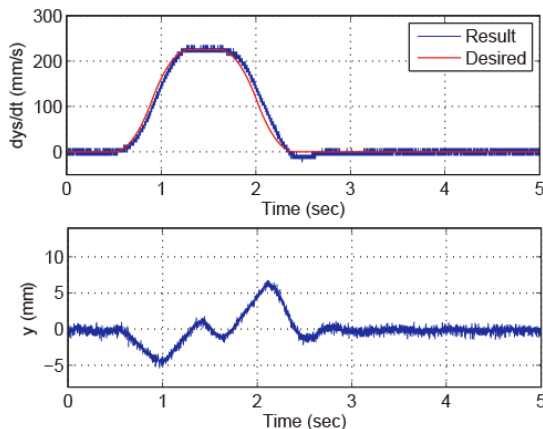


図 17．固有振動周期の整数倍の結果

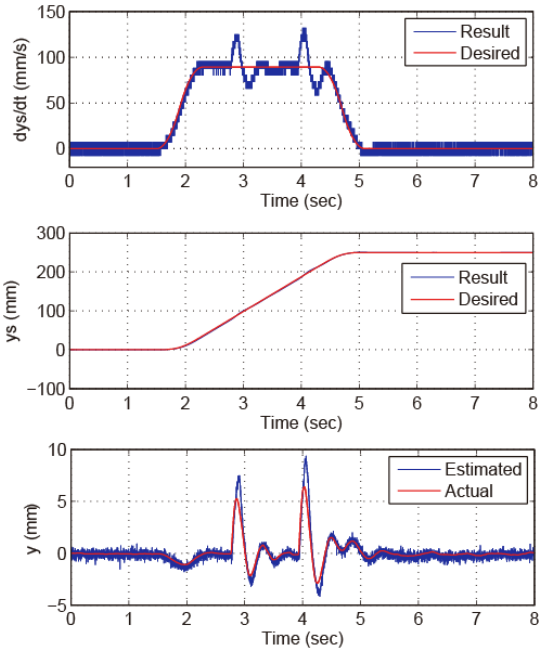


図 18．固有振動周期の整数倍の結果

2 自由度積分型最適サーボ系を適用した搬送実験において，搬送方向に外乱を加えた結果を図 18 に示す．外乱において，速やかに浮上物体の振動が抑制されていることが確認でき，また振動抑制時には目標軌道から外れるが，振動抑制後は目標軌道に沿って動作し，最終的に目標位置に到達できることが確認できた．

以上より，磁気浮上搬送系に対して，位置計測の課題を解決するための 3 次元位置推定を提案し，また非接触把持搬送制御のロバスト性を向上させるための手法を提案し，実験検証により，提案手法の有効性を示した．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

小林義光，亀山頌太，佐々木実，“2 自由度積分型最適サーボ系を用いた磁気浮上搬送制御の実現”，日本機械学会論文集 (C 編)，査読有，79 巻 804 号，pp.2673-2683 (2013.8)。(査読有)
DOI:10.1299/kikaic.79.2673

〔学会発表〕(計 4 件)

Yoshimitsu Kobayashi，Yoko Terai and Minoru Sasaki，“Vibration Control of Active Electromagnetic Levitation System with Three-Dimensional Position Estimation by Current and Magnetic Flux”，13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS2013)，No.TB01-4，2013

年 10 月 20～23 日, Kimdaejung
Convention Center, Gwangju, Korea
小林義光, 寺井陽子, 佐々木実, “ 磁気浮
上系の 3 次元位置推定を用いた水平制振
制御の実現 ”, 第 13 回計測自動制御学会
システムインテグレーション部門講演会
講演論文集, 講演番号 2H2-7,
pp.1548-1553, 2012 年 12 月 18～20 日,
福岡国際会議場 (福岡市博多区石城町
2-1)
小林義光, 亀山頌太, 佐々木実, “ 2 自由
度積分型最適サーボ系を用いた磁気浮上
搬送制御の実現 ”, 日本機械学会ロボティ
クス・メカトロニクス講演会 2012 講演論
文集 DVD-ROM, 2A1-G08, 2012 年 5 月 27
～29 日, アクオシティ浜松 (静岡県浜松
市中区中央 3-12-1)
小林義光, 寺井陽子, 佐々木実, “ オブザ
ーバを用いた磁気浮上系の 3 次元位置推
定の実現 ”, 日本機械学会ロボティクス・
メカトロニクス講演会 2012 講演論文集
DVD-ROM, 1A1-J05, 2012 年 5 月 27～29
日, アクオシティ浜松 (静岡県浜松市中
区中央 3-12-1)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 義光 (KOBAYASHI, Yoshimitsu)

研究者番号: 4 0 5 0 9 2 7 0